

基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法

靳 新

(沈阳工学院, 信息与控制学院, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 针对目前柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法忽略了不同重力影响下的机械臂驱动力变化, 导致柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制效果较差的问题, 提出了基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法; 基于构建 PMSM 驱动数学模型, 采用 PMSM 的矢量控制方法, 分析驱动力矩矢量; 根据驱动力矩矢量分析结果, 分析不同重力环境下有、无摩擦时的驱动力矩; 构建柔性关节模型, 分析其在不同重力环境下遇到的重力释放问题, 使用自适应反演滑模控制方法, 设计控制律, 保证机械臂能够按照既定的方向运动, 使机械臂具有鲁棒性; 根据柔性关节空间机械臂动力学特性, 分析不同重力环境下基于 PMSM 驱动力矩, 确定重力项是随之发生改变的; 设计控制器, 构建动力学模型, 确保空间阶段能够最大限度跟踪运动轨迹; 实验结果表明, 所提方法 X 轴、Y 轴的末端跟踪结果均与实际运动轨迹一致, 误差为 0; 关节控制力矩在时间为 3 s 时, 出现了最大为 0.5 N·m 的误差, 说明所提方法的跟踪控制效果较好。

关键词: PMSM 驱动; 柔性关节空间; 机械臂轨迹; 跟踪控制

Trajectory Tracking Control Method of Flexible Joint Space Manipulator Based on PMSM Drive

JIN Xin

(School of Information and Control, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current trajectory tracking control method of flexible joint space manipulator ignores the change of manipulator driving force under the influence of different gravity, resulting in the poor trajectory tracking control effect of the flexible joint space manipulator, a trajectory tracking control method of the flexible joint space manipulator based on permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive is proposed. Based on the PMSM driving mathematical model, the PMSM vector control method is used to analyze the driving torque vector. According to the analysis results of the driving torque vector, the driving torque with and without friction in different gravity environments is analyzed. The flexible joint model is constructed, and the gravity release problem encountered in different gravity environments is analyzed. The control method of adaptive inverse sliding mode is used to design the control law to ensure that the manipulator can move in the given direction and make the manipulator robustness. According to the dynamic characteristics of flexible joint space manipulator, the driving torque based on PMSM in different gravity environments is analyzed, and the gravity term is determined to change accordingly. The controller is designed, and the dynamic model is constructed to ensure that the motion trajectory can be tracked to the greatest extent in the space stage. The experimental results show that the end tracking results of x-axis and y-axis are consistent with the actual motion trajectory, which is no error. The maximum joint control torque is 0.5 N·m when the time is 3 s, which shows that the proposed method has good tracking control effect.

Keywords: PMSM drive; flexible joint space; manipulator trajectory; tracking control

0 引言

转轴向载荷的传递即使是采用空间机械臂和行星齿轮传动元件, 仍受柔性因素的影响。但在谐波传动下, 这对空间机器人转轴传递仍有影响。由于柔性关节可能引起控制系统迟滞、非线性耦合、高频共振等问题, 因此, 柔性关节空间机械臂运动时, 该关节对于机械臂的精准抓取、运动方向和整个运动的平滑度都会产生较大影响, 甚至威胁整个系统的使用安全性^[1-2]。未考虑柔性关节控制器在实

际应用中存在的问题, 会导致系统不稳定。为了改善上述问题, 应对机械臂结构出现的干扰项目进行分析, 此时的柔性关节成为了机械臂轨迹跟踪的一个障碍^[3]。因此, 在设计柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法时, 不可忽视柔性关节的动态学变化。为了消除这一障碍, 必须合理控制柔性关节空间机械臂运动轨迹。

当前相关领域研究人员针对柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制进行了研究。文献 [4] 提出了基于模型预测控制的柔性关节空间机械臂的轨迹跟踪控制方法。利用欧拉一

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-03-13。

作者简介: 靳 新(1981-), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事计算机应用技术方向的研究。

引用格式: 靳 新. 基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 92-97.

拉格朗日公式, 构建机械臂运动的动力学模型, 结合数值仿真, 对连续运动的机械臂运动轨迹进行预测。文献 [5] 提出了机械臂关节空间轨迹的神经网络滑模跟踪控制方法, 忽略系统扰动的不确定项, 构建全局 PID 滑模控制器, 通过等效切换控制律, 对不确定项的逼近值补偿, 达到精准控制的目的。然而, 上述两种方法仅考虑了机械臂的控制性能, 而在不同重力环境下, 重力释放会对机械臂驱动力造成一定影响, 导致控制效果不理想。

为了解决这个问题, 提出了基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法。通过 PMSM 驱动力矩分析方法, 分析不同重力环境下有、无摩擦时的驱动力矩。通过构建柔性关节模型, 对机器人的末端执行机构进行快速准确的位置控制。使用自适应反演滑模控制方法, 设计控制律, 保证机械臂能够按照既定的方向运动, 使机械臂具有鲁棒性。根据柔性关节空间机械臂动力学特性, 设计控制器, 构建柔性关节空间机械臂动力学模型, 确保空间阶段能够最大限度跟踪运动轨迹, 有效减小机械臂轨迹跟踪控制误差, 从而保证柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制效果。

1 不同重力环境下基于 PMSM 驱动力矩分析

1.1 PMSM 驱动数学模型构建

为了得到 PMSM 的数学模型, 应忽略电磁铁芯饱和状态, 不计量 PMSM 电机中电磁损耗, PMSM 调速控制中, 构建旋转变坐标系下的 PMSM 驱动模型^[6]。该模型是由两部分组成的, 分别是 PMSM 电压方程和驱动力矩方程, 如下所示。

1) PMSM 的电压方程为:

$$\begin{aligned} U_A &= RI_A + \frac{d\psi_A}{dt} - V_\theta \psi_B \\ U_B &= RI_B + \frac{d\psi_B}{dt} - V_\theta \psi_A \end{aligned} \quad (1)$$

公式 (1) 中, R 表示定子电阻; U_A 、 U_B 分别表示定子电压在直轴和交轴上的分矢量; I_A 、 I_B 分别表示定子电流在直轴和交轴上的分矢量; ψ_A 、 ψ_B 分别表示定子磁链矢量在直轴和交轴上的分矢量; V_θ 表示转子角速度^[7-9]。

2) PMSM 的驱动力矩方程为:

$$E = n(\psi_A I_B - \psi_B I_A) = n[\psi_f I_B + (q_A - q_B) I_A I_B] \quad (2)$$

公式 (2) 中, q_A 、 q_B 分别表示在直轴和交轴上的电感; ψ_f 表示转子在定子上的耦合电磁量; n 表示电磁极个数。

根据构建的旋转坐标系下的 PMSM 驱动模型, 在保证各项参数不变的情况下, 对驱动力矩的控制与对直轴和交轴上的电流控制方式一致^[10-12]。针对给定的输出驱动力矩, 存在的直、交轴的控制组合将影响 PMSM 驱动电机的效率和力矩输出能力。

1.2 驱动力矩矢量分析

采用 PMSM 的矢量控制方法, 可使柔性关节空间机械臂轨迹跟踪在允许的速度和位置范围内。机械臂上的转子和定子均使用了三相绕组形式, 使两者产生了耦合关系, 此时的转子是一种永磁体结构, 内应力不均匀性很小^[13]。而定子是通过磁场之间相互作用而得到的, 基于此, 根据

构建的 PMSM 驱动数学模型, 分析驱动力矩:

1) 设定子电流在直轴上的分矢量为 0, 由于柔性关节空间机械臂在运动时没有产生直轴电磁成分, 所有也不会出现磁体恢复到磁中性的过程, 因此, 该矢量设置下的驱动力矩与电流是成正比例关系的^[14-15]。

2) 设功率因素为常数 1, 由于电力负载在变化过程中, 逆变电路中的逆变电容吸收能力较强, 使得绕组总磁保持恒定状态, 因此, 该矢量设置下的驱动力矩与电流是呈线性关系的^[16]。

在满足输出转矩要求时, 定子电流在直轴和交轴上的分矢量变化最小, 也降低了机械臂运动所产生的能耗。通过设置的矢量, 能够增强逆变电容吸收能力, 降低运行成本^[17-18]。因此, 对于驱动力矩的矢量控制也就是对 PMSM 电流的控制, 通过控制定子电流, 能够使电磁波动幅度与定子交联幅度一致, 即使在快速运动模式下, 设置这种矢量也能保证输出的驱动力矩与目标一致。

1.3 不同重力环境下 PMSM 驱动力矩分析

根据驱动力矩矢量分析结果, 分析不同重力环境下有、无摩擦时的驱动力矩, 如图 1 所示。

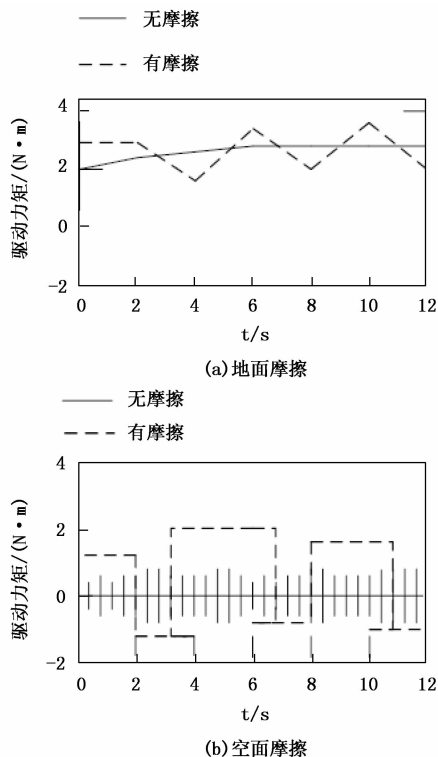


图 1 不同重力环境下有、无摩擦时的驱动力矩

由图 1 可知, 在不同重力情况下, 空间摩擦对驱动力矩影响相比于地面摩擦来说较大。针对空间无摩擦情况, 驱动力矩在 -1 和 1 范围内波动, 趋近于 0。此时的驱动力矩是与运动方向呈正相关的相位力矩; 针对地面无摩擦情况, 由于驱动力矩的产生就是为了克服摩擦力矩的, 所以驱动力矩是与运动方向呈负相关的相位力矩; 针对地面有摩擦情况, 随着时间的增加, 驱动力矩为了克服重力对柔

性关节空间机械臂的影响,上下波动幅度较大^[19]。

2 考虑摩擦的机械臂轨迹跟踪控制方案设计

在重力环境下,设计考虑摩擦情况下的机械臂轨迹跟踪控制方案。假定该机械臂只在平面内运动,每个柔性关节都建模为一个线性弹簧,如图 2 所示。

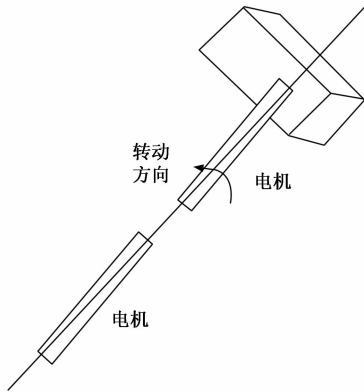


图 2 柔性关节模型

由图 2 可知,在刚性较小的情况下,关节部位的柔性更大。在这种情况下,共振频率较低,使系统的有效带宽大幅下降,严重影响了系统的稳定;在刚性较大的情况下,关节的柔韧性相对较低,这对于系统的控制更为有利。因此,柔性关节的控制策略就是要解决如何通过合理的设计来减小或消除关节的挠性对关节的影响,从而改善其稳定性^[20]。在刚性较小的情况下,关节部位的柔性更大。在这种情况下,控制器已不能满足控制品质的需要,因此,必须要有较高的控制精度。要解决这一问题,必须考虑以下两方面:(1)考虑外部干扰、参数不确定性和结构不确定性,并对其进行了更为准确的建模;(2)研制一种具有较好的稳定性的控制器,以解决控制系统初始输出时的抖动幅度过大的问题,并对机器人的末端执行机构进行快速准确的位置控制,使其能够顺利地进行空间作业。

对于柔性关节空间机械臂在不同重力环境下遇到的重力释放问题,使用自适应反演滑模控制方法^[21],其流程如图 3 所示。

由图 3 可知,在给出初始力矩的末端轨迹的情况下,确定关节速度,并根据动力学方程计算关节力矩^[22]。实时计算更新控制器参数,根据输入输出数据,得到新的控制力矩和关节速度,完成了机器人末端轨迹的跟踪控制。

依据自适应反演滑模控制流程,设计控制律,保证机械臂能够按照既定的方向运动,运动所形成的面为滑模面^[23]。通过设计与扰动无关的滑模面,能够保证机械臂具有鲁棒性。

步骤一:确定滑模面 S 。

为了克服机器人手臂的真实模型参数不确定,采用了一种基于固定时间的运动控制策略,以解决机器人运动过程中存在的参数偏差和未知的动态干扰。固定时间收敛性是指在给定的时间范围内,由任何初值向有限时域收敛,

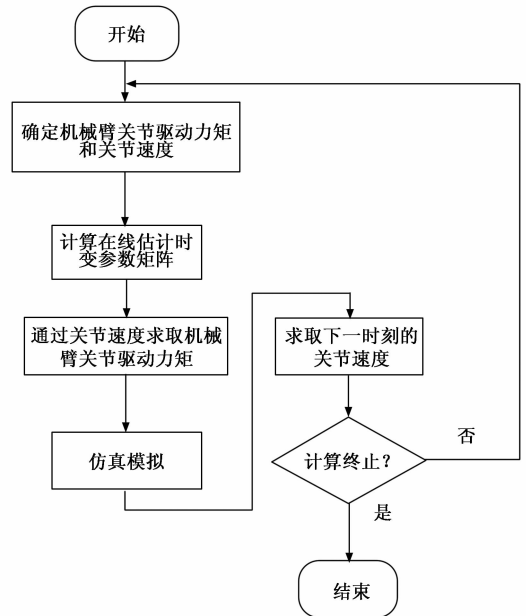


图 3 自适应反演滑模控制流程

并且具有均匀的收敛性。在此基础上,利用自适应滑动模态控制算法来确定系统的运动状态,以保证系统的整体运动稳定^[24]。

当观察到复杂干扰时,这种时间观测器的估算值可以在真实干扰情况下得到全局收敛,并且具有很好的计算精度。在给定的初始干扰条件下,固定时间观测器的估计误差具有相同的收敛时间,而且在一定的参数下,可以使收敛性缩短。在对定时干扰观测的基础上,提出了一种具有指数收敛性的自适应滑动表面。设计步骤如下:在确定了滑动模态之后,将等速度滑模近似规律与纯粹指数近似法则相结合,设计了一种指数收敛性的滑模拟合规律。在此基础上,将自适应参数引入到滑模趋近律中,以抑制滑动模态的抖动,从而检验其稳定性。

计算关节角度误差,公式为:

$$\theta' = \theta_0 - \theta \quad (3)$$

公式(3)中, θ_0 表示给定的关节角度; θ 表示实际运动的关节角度。基于此,确定滑模面,公式为:

$$S = \mathbf{F} \cdot \theta' \quad (4)$$

公式(4)中, \mathbf{F} 表示离线矩阵。当柔性关节空间机械臂状态距离滑模面较远时,滑模面计算结果趋近于无穷大值。未知模型参数对趋近律的影响是可以忽略不计的。随着时间的增长,趋近律呈指数速率增长,趋近于0,此时柔性关节空间机械臂运动轨迹接近于滑模面;当柔性关节空间机械臂运动轨迹处于滑模面附近时,趋近律趋近于0,此时柔性关节空间机械臂呈等速率运动,其运动轨迹趋近于滑模面。

针对等速趋近律的运动模式下,柔性关节空间机械臂运动速度与抖振水平是相互影响的^[25]。为了保证柔性关节空间机械臂能够获取快速趋近律时,能够有效抑制抖振情况。

步骤二: 设计控制律。

控制律公式为:

$$u(x) = \begin{cases} u^+(x) & s(x) > 0 \\ u^-(x) & s(x) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

公式 (5) 中的控制律主要由两部分组成, 分别为等效控制律, 用于机械臂沿着滑模面运动的控制力; 切换控制律, 用于抵抗外界干扰的控制力^[26]。当柔性关节空间机械臂在滑模面上运动时, 满足 $S = 0$, 即一阶非线性控制系统的切换控制律由趋近律决定。

步骤三: 控制器设计。

柔性关节空间机械臂动力学满足如下特性:

特性 1: 惯性矩阵是对称正定矩阵, 描述公式为:

$$C_m \|\eta\|^2 \leq \eta^T W(\theta) \eta \leq C_M \|\eta\|^2 \quad (6)$$

公式 (6) 中, $W(\theta)$ 表示关节角度 θ 的惯性矩阵; η 表示自适应更新控制参数; C_m 、 C_M 分别表示对称正定矩阵的最大和最小特征值; $\|\eta\|$ 表示标准的自适应更新控制的欧几里得范数^[27]。

特性 2: 斜对称矩阵, 描述公式为:

$$\eta^T (\dot{W}(\theta) - 2B(\theta, \dot{\theta})) \eta = 0 \quad (7)$$

公式 (7) 中, $\dot{W}(\theta) - 2B(\theta, \dot{\theta})$ 表示斜对称矩阵; $B(\theta, \dot{\theta})$ 表示机械臂动力学模型标准值。

为了保证设计的控制器具有可靠性, 结合上述分析的不同重力环境下基于 PMSM 驱动力矩, 确定重力项是随之发生改变的。当机械臂处于地面调试阶段时, 构建的动力学模型可表示为:

$$W(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \tau - \omega \quad (8)$$

公式 (8) 中, ω 为重力项; τ 为空间阶段的动力学项。当机械臂处于空间阶段时, 此时 ω 为 0, 机械臂处于自由运动状态, 此时的重力项是一个扰动项目。

在高精密运动中, 关节的柔性比连杆的挠性更大。忽略了关节的变形对系统的稳定性的影响, 将会使机器人的运动不稳定。实际上, 为了保证工作的平稳进行, 在柔性关节空间机械臂运动中, 必须对由各个运动参数引起的弹性振动进行抑制, 并通过燃烧燃料来实现。在此基础上, 提出了一种基于机械臂运动方程的优化运动模型, 并给出了一种基于有限元模型的机器人运动模型, 使得系统的输出能够跟踪所需的输出, 并把机器人从最初的位置移动到所需的最终位置, 从而减少了操作的要求。因此, 在弹性关节轨道规划中, 要以最少的燃料消耗来达到最大限度的振动, 同时要达到关节轨道规划的约束。

为了方便描述该问题, 可将动力学方程转换成状态方程形式, 如下所示:

$$\dot{z} = \alpha(z) + \beta x \quad (9)$$

公式 (9) 中, $\alpha(z)$ 、 β 分别表示状态变量 z 和时间的矢量函数; x 表示控制变量。

在此基础上, 给出了一种基于柔性关节振动的最佳阻尼能量控制问题: 在一定的时间范围内, 柔性关节空间机械臂能够从初始位置平稳地持续地移动到期望的目标位置,

减少了操作参数的生成, 避免了过多的参数影响了数据的获取。问题的被积函数仅与约束行为、固定终端时间、约束终端状态和综合性能指数相关, 为此, 结合公式 (7) 将动力学方程转换成状态方程的转换结果, 使其在整个运动过程中, 关节轨迹平滑, 无振动, 且在起始和结束时, 其速度曲线平滑、连续。所设计的关节角度速度变化幅度较小, 能够有效地防止由于转速变化太大而造成的系统振动。该方法能确保系统在运行时的稳定, 而且不会产生残余振动, 对终端执行机构的准确定位和控制精度有很大的帮助。

步骤四: PMSM 矢量控制。

由于设计的控制器对机械臂运动的不确定性具有较强鲁棒性, 为此, 提出了一种 PMSM 矢量控制方法, 通过该方法对机械臂进行控制, 确保空间阶段具有良好的控制效果, 此时的扰动项, 即重力项取最大值, 能够最大限度满足精准跟踪效果。由于正弦波 PMSM 转子磁动势方向不变, 所以该方向随着转子位置变化而发生改变, 但幅值保持不变, PMSM 矢量控制方式也是根据磁场方向改变而发生变化的。

假设 PMSM 转子存在一个虚拟励磁绕组, 那么当绕组通过虚拟励磁电流的时候, 其与 PMSM 转子磁动势一致。为此, PMSM 与电励磁同步的电动机等效, 并保持电流恒定不变, 等效的虚拟励磁绕组是由恒定电流为机械臂供电的。PMSM 是通过转子磁链的定向控制, 使其在基本频率以下恒定在力矩工作范围, 从而使定子电流在 q 轴以上, 其值为 0。该情况下的控制方案较为简单, 保持输入变量恒定不变, 使电磁转矩和电流成正比, 由此确定转子在空间的位置, 然后通过控制逆变器让定子合成电流矢量落在 q 轴上面。

步骤五: 检测电动机转子位置。

使用定子绕组的反向电动势估计 PMSM 转子位置, 适用于机械臂高速运转。当反电动势较小时, 转子估计的误差就会变大。当机械臂以较低速度运行时, 根据定子部分的电磁饱和特点, 给定子绕组加上额外电压, 进而获取电感变化量。结合相电感转子位置函数, 计算转子位置角, 进而保持 PMSM 速度闭环系统的稳定性。

步骤六: 转子磁链定向控制。

由于定子电流轴分量为 0, 为了使 PMSM 控制方法更加简单, 使励磁和轴阻尼绕组结合成一对耦合线圈, 保证其不会与定子电流出现相互作用, 从而让轴和绕组完全解耦。转子永磁磁通和定子电流是相互解耦的, PMSM 控制结构简单, 转矩也相当稳定, 调速范围比较宽, 特别适用于高性能的空间机械臂场合。当定子电流增大时, 由于电枢会出现反应, 导致气隙合成的机械臂磁链将会增大, 大幅度提升电机定子电压, 促使 PMSM 功率降低。因此, 使用这种控制方式输出的电流限幅在要求范围内。

通过检测转子位置角, 将电流给定信号的正弦调制以后, 计算三相电流给定的信号。采用三相电流闭环控制方案, 使实际电流信号快速跟随给定的信号, 达到预期的跟

踪控制效果。

3 实验分析

3.1 实验平台

设计的实验平台使用意法半导体芯片 STM32 和 H 桥驱动电机，以 H 桥驱动 DC 电机，采用脉宽调制波控制电机运行速度，电动机工作时的驱动电流由霍尔传感器采集，数据通过导线传输给控制单元 ADC，经模数转换后送控制器进一步处理。设计的实验平台如图 4 所示。

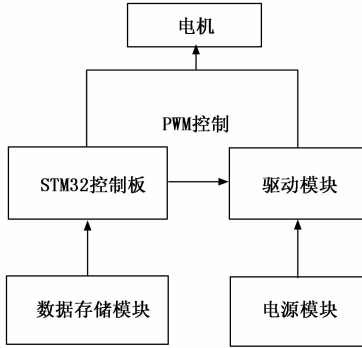


图 4 实验平台

由图 4 可知，柔性关节空间机械臂是由 DC 电机提供电源的，机械臂由机械手和机械杆组成。机械臂的一端与电机相连，该端是轴向端，另一端与驱动模块相连，该端是自由端。DC 电机作为基本的驱动装置，其产生的转矩是由电机电流和磁场相互作用而生成的。为此，通过微重力环境实验，可以实现对基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法研究合理性的验证。

3.2 实验数据分析

末端轨迹跟踪和关节控制力矩实验数据，如图 5 和 6 所示。

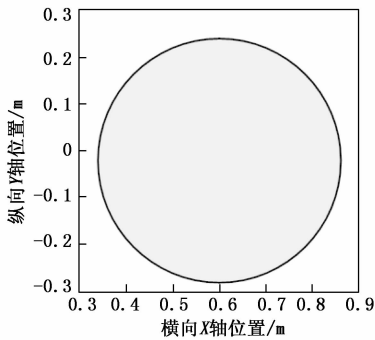


图 5 末端轨迹跟踪

由图 5 和 6 可知，柔性关节空间机械臂在地面能够使系统输出结果具有一定规律性，且关节控制力矩不是很大，能够满足机械臂要求。

3.3 实验结果与分析

分别使用基于模型预测控制的柔性关节空间机械臂的轨迹跟踪控制方法、机械臂关节空间轨迹的神经网络滑模跟踪控制方法和基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨

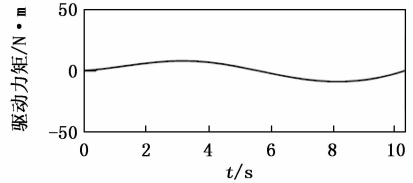


图 6 关节控制力矩

迹跟踪控制方法，对比分析末端轨迹跟踪和关节控制力矩跟踪和控制结果，如图 7 和 8 所示。

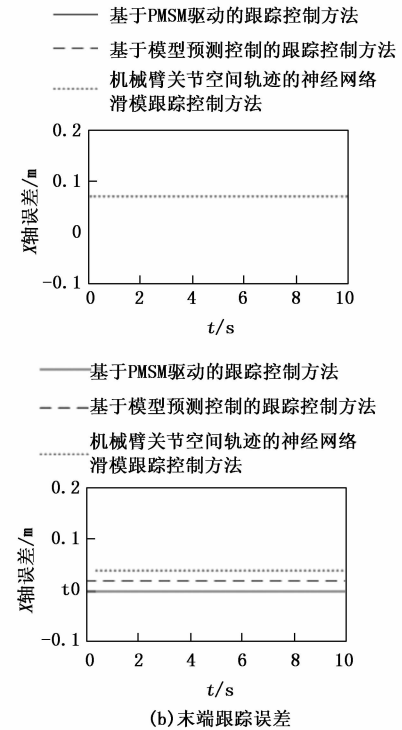
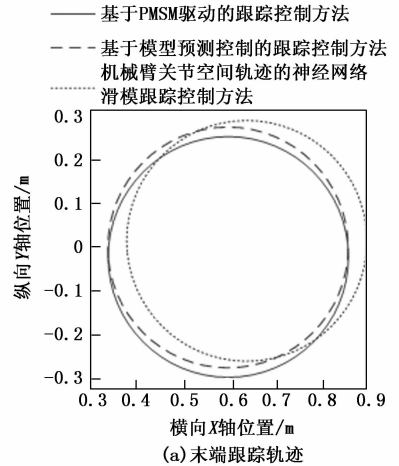


图 7 3 种方法末端轨迹跟踪结果对比

由图 7 可知，使用基于模型预测控制的柔性关节空间机械臂的轨迹跟踪控制方法，X 轴的跟踪结果与实际运动轨迹是一致的，所以误差为 0。Y 轴的跟踪结果与实际运动轨迹存在一定偏差，所以误差为 0.2 m；使用机械臂关节空

间轨迹的神经网络滑模跟踪控制方法, X 轴的跟踪结果与实际运动轨迹不一致, 所以误差为 0.8 m。Y 轴的跟踪结果与实际运动轨迹也不一致, 所以误差为 0.4 m; 使用基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法, X 轴、Y 轴的跟踪结果均与实际运动轨迹一致, 误差为 0。

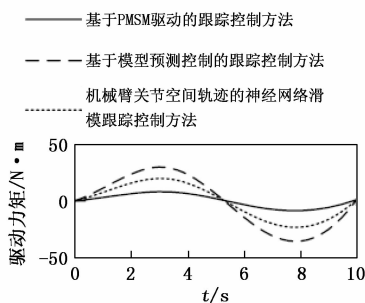


图 8 3 种方法关节控制力矩控制结果对比

由图 8 可知, 使用基于模型预测控制的柔性关节空间机械臂的轨迹跟踪控制方法、机械臂关节空间轨迹的神经网络滑模跟踪控制方法均与实际关节控制力矩不一致, 使用前一种方法的误差相对更大, 最大误差为 $\pm 16 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。使用基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法, 与实际关节控制力矩基本一致, 只要在时间为 3 s 时, 出现了最大为 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的误差。

4 结束语

针对不同重力环境下的驱动力差异问题, 提出了基于 PMSM 驱动的柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制方法。通过 PMSM 驱动, 在考虑重力影响前提下, 分析关节角度对驱动力矩影响情况。构建柔性关节模型, 使用自适应反演滑模控制方法, 设计控制律, 保证机械臂能够按照既定的方向运动。根据柔性关节空间机械臂动力学特性, 设计控制器, 构建动力学模型, 确保空间阶段能够最大限度跟踪运动轨迹, 从而实现柔性关节空间机械臂轨迹跟踪控制。通过实验研究, 验证了该方法研究的合理性, 能够精准跟踪和控制柔性关节空间机械臂运动轨迹。

虽然使用该方法具有精准跟踪和控制效果, 但也有很多地方有待完善, 详细工作如下所示: 针对考虑重力影响的驱动力分析, 只考虑了重力与摩擦力对驱动力的影响, 未考虑柔性耦合对驱动力的影响。

参考文献:

[1] 陈志勇, 张婷婷. 柔性基、柔性关节空间机械臂的运动混合控制 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (12): 1466-1473.
 [2] 白小军, 陈 力. 漂浮基柔性关节空间机械臂运动迭代学习控制 [J]. 机械制造与自动化, 2019, 48 (2): 149-151.
 [3] 张 明, 房立金, 孙 凤, 等. 永磁变刚度柔性关节的力学分析与控制器设计 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (5): 89-96.
 [4] 吴 昊, 谭 元, 郭小龙, 等. 一种基于模型预测控制的柔性关节空间机械臂的轨迹跟踪控制 [J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45 (2): 38-44.
 [5] 裴红蕾. 机械臂关节空间轨迹的神经网络滑模跟踪控制 [J].

制造技术与机床, 2020 (5): 43-48.
 [6] 刘福才, 刘 林, 徐智颖. 柔性关节空间机械臂奇异摄动模糊 PID 控制仿真研究 [J]. 高技术通讯, 2019, 29 (7): 661-667.
 [7] 孟玲聪, 刘福才, 赵文娜, 等. 考虑重力影响的柔性关节空间机械臂自适应迭代学习控制 [J]. 高技术通讯, 2020, 30 (10): 1078-1084.
 [8] 梁 捷, 秦开宇, 陈 力. 弹性关节空间机械臂级联智能滑模控制 [J]. 力学季刊, 2019, 40 (3): 529-542.
 [9] 毕 伟, 谈 横. 串联型机械臂的自适应鲁棒容错控制研究 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (5): 63-67, 72.
 [10] 谷勇霞, 张玉玲, 赵杰亮, 等. 考虑含间隙关节的漂浮基空间机械臂动力学输出特性研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (3): 99-108.
 [11] 张 明, 房立金, 孙 凤, 等. 永磁变刚度柔性关节的力学分析与控制器设计 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (5): 89-96.
 [12] 朱 萌, 孟 焯, 张 豪, 等. 基于 ROS 的 6 自由度机械臂运动轨迹规划 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (4): 1-3, 9.
 [13] 王保民, 张明亮. 基于 RBF 神经网络的弧焊机器人轨迹跟踪控制方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45 (3): 85-89.
 [14] 李 硕, 李西兴, 赵 燕. 双臂空间机器人任务空间内的轨迹跟踪控制优化 [J]. 机械传动, 2020, 44 (10): 80-85.
 [15] 杨 涛, 邹河彬, 刘小勇, 等. 仿人机械臂同步控制仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36 (7): 302-307.
 [16] 雷荣华, 陈 力. 柔性空间机械臂的自适应 H_∞ 容错抑振混合控制 [J]. 宇航学报, 2020, 41 (4): 472-482.
 [17] 于树友, 孟凌宇, 许 芳, 等. 基于三步法的机械臂轨迹跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (5): 1034-1044.
 [18] 王 炎, 赵 京, 陈雨青. 基于三角函数的机器人手臂轨迹跟踪控制重力补偿算法 [J]. 北京工业大学学报, 2019, 45 (7): 623-630.
 [19] 姚 伟, 刘辽雪, 郭 毓, 等. 自由漂浮柔性空间机械臂抗扰控制 [J]. 南京理工大学学报, 2021, 45 (1): 63-70.
 [20] 张文辉, 陈浩文, 闻 志, 等. 面向未知目标的柔性关节空间机器人滑模控制 [J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47 (3): 49-56.
 [21] 葛 婧. 文献扫描机器人多关节机械臂滑模控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 112-116.
 [22] 杨绳政, 叶小娟, 邓 冰, 等. CK-4 10 W-40 在东风柳汽国六发动机上的应用 [J]. 润滑油, 2021, 36 (4): 6-11.
 [23] 杨 亮, 陈 勇, 刘 治. 基于参数不确定机械臂系统的自适应轨迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (11): 2485-2490.
 [24] 陆佳皓, 平雪良. 一种机械臂最优时间-冲击轨迹优化算法 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38 (10): 1548-1554.
 [25] 黄晓林, 周浩锋, 曾泳达, 等. 基于手势识别远程同步控制的智能机械臂研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (9): 128-131, 136.
 [26] 蔡永超. 机械臂关节空间轨迹的时间最优智能规划研究 [J]. 机械设计与制造, 2020 (3): 272-276.
 [27] 冯 钧, 孔建寿, 王 刚. 一种柔性空间双臂机器人的协同控制和避障方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46 (5): 10-17.